

Bogusław KASPERCZYK

ANALIZA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI MODELU ELEKTROMAGNETYCZNEGO PRZETWORNIKA GRUBOŚCI POWŁOKI

Streszczenie. W artykule przedstawiono fizykomatematyczny model elektromagnetycznego przetwornika grubości powłok nieferromagnetycznych pokrywających podłoża ferromagnetyczne oraz rezultaty analiz oddziaływania na sygnał wyjściowy przetwornika wybranych wielkości wpływowych: grubości i rezystywności powłoki oraz przenikalności magnetycznej względnej materiału podłoża. Wyniki numerycznych obliczeń przetwarzania porównano z wynikami eksperymentów.

ANALYSIS OF SOME SELECTED PROPERTIES OF THE COATING THICKNESS ELECTROMAGNETIC TRANSDUCER MODEL

Summary. The paper presents the physical-mathematical model of a coating thickness electromagnetic transducer as well as the results of analysis of its selected properties. The analysis is carried out for three selected influence quantities, namely: the substrate material magnetic permeability, the substrate thickness and the substrate material conductivity. The experimental verification proves that the calculations for the physical-mathematical model of the coating thickness transducer and the results of the tests are close enough to be satisfactory.

1. WPROWADZENIE

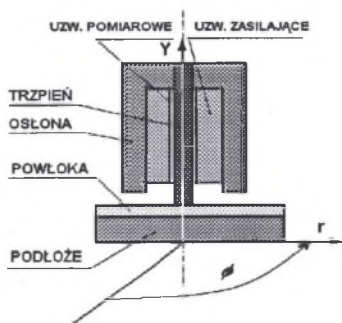
W nieniszczących pomiarach grubości nieferromagnetycznych powłok pokrywających podłoża ferromagnetyczne znajdują zastosowanie między innymi warstwomierze wyposażone w elektromagnetyczne przetworniki grubości [1, 2]. Pomiary nimi odznaczają się małą pracochłonnością i nie wymagają specjalnej obróbki mechanicznej (lub chemicznej) powierzchni badanej powłoki. Przetworniki tego rodzaju można stosować w warunkach przemysłowych, w pomiarach powłok o grubościach od kilku mikrometrów. Wyznaczenie wartości grubości powłoki polega na jednostronnym przyłożeniu przetwornika do powierzchni powłoki i pomiarze wywołanej tym działaniem zmiany strumienia magnetycznego w magnetowodzie

przetwornika. Powłoka, która stanowi jedną z nieferromagnetycznych szczelin w tym magnetowodzie, może być przewodząca elektrycznie (cynkowa) lub nieprzewodząca (lakierowa).

Analiza niepewności wyników pomiarów dokonanych takim przyrządem wymaga ustalenia oddziaływania wybranych wielkości wpływowych na układ przetwornik grubości – obiekt badań. Wykorzystuje się w tym celu model fizykomatematyczny przetwornika. Ustalenie funkcji przetwarzania takiego przetwornika następuje poprzez rozwiązanie złożonego zagadnienia rozkładu pola elektromagnetycznego w wieloparametrowej przestrzeni. Przydatne tutaj okazują się metody numeryczne, a szczególnie programy specjalistyczne. W pracy wykorzystano program ANSYS [3], który pozwala metodę elementów skończonych zastosować do analizy zarówno statycznych zagadnień liniowych, jak i złożonych, dynamicznych.

2. KONSTRUKCJA ELEKTROMAGNETYCZNEGO PRZETWORNIKA GRUBOŚCI POWŁOKI

Elektromagnetyczny przetwornik grubości o symetrii osiowej, znany w literaturze również jako przetwornik indukcyjny, jest stosowany w pomiarach grubości powłok pokrywających podłoża ferromagnetyczne. Tworzy go dwuuzwojeniowa cewka o symetrii osiowej, nawinięta na ferromagnetycznym trzpieniu walcowym (rys.1). Uzwojenie zasilające – zasilane monoharmonicznym prądem przemiennym o stałej amplitudzie – i uzwojenie pomiarowe są rozłożone równomiernie wzdłuż walcowego trzpienia. Pierścieniowa osłona ferromagnetyczna otacza od zewnątrz cewkę, łącząc się z jednej strony z trzpieniem.



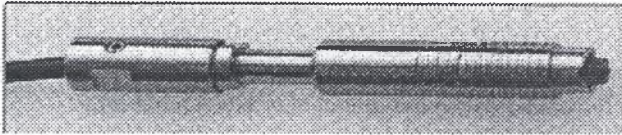
Rys.1. Szkic przekroju osiowo-symetrycznego modelu elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki

Fig.1. Axial-symmetrical cross-section of the coating thickness electromagnetic transducer model

Magnetowód z dwoma szczelinami tworzą: trzpień, ekran i ferromagnetyczne podłoże (np. z blachy stalowej). Wolny koniec trzpienia styka się z powierzchnią powłoki (np. cynkowej lub lakierniczej), która stanowi jedną ze szczelin w obwodzie magnetycznym. Druga szczelina, w skład której wchodzi warstwa powietrza i badana powłoka, występuje pomiędzy pierścieniową osłoną a ferromagnetycznym podłożem. Szerokość szczelin determinowana jest grubością powłoki. W rzeczywistych konstrukcjach końcówka trzpienia stykająca się z powłoką może mieć kształt walca, stożka ściętego lub wycinka kuli.

Zewnętrzne monoharmoniczne źródło prądowe wywołuje w zasilającym uzwojeniu przepływ prądu przemiennego o stałej amplitudzie i stałej częstotliwości z zakresu $80 \div 100$ Hz. Wartość napięcia elektrycznego U , indukowanego w uzwojeniu pomiarowym, jest bezpośrednio zależna od rozkładu pola indukcji magnetycznej wzdłuż ferromagnetycznego trzpienia. Jest ona funkcją wielu zmiennych, której jednym z wielu argumentów jest grubość powłoki.

Spotykane konstrukcje przetworników mają średnicę od 4 do 15 mm i długość kilkadziesiąt mm (rys.2).



Rys.2. Zdjęcie elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki

Fig.2. Coating thickness electromagnetic transducer

W każdym elektromagnetycznym przetworniku grubości można wyodrębnić dwa konstrukcyjnie zintegrowane elementarne przetworniki:

- czujnik,
- przetwornik natury sygnału.

Pierwszy z nich przetwarza grubość powłoki w wartość indukcji magnetycznej, występującą w magnetowodzie przetwornika grubości, zgodnie z ogólną zależnością:

$$B = F_{pp}(d_{pw}), \quad (1)$$

gdzie:

B – oznacza wartość wektora indukcji, a d_{pw} – jest grubością powłoki.

Działanie drugiego elementarnego przetwornika – przetwornika natury sygnału – polega na przetworzeniu indukcji magnetycznej, skojarzonej z uzwojeniem pomiarowym, w napięcie elektryczne mierzone na wyprowadzeniach tego uzwojenia. Funkcję przetwarzania dla drugiego elementarnego przetwornika można zapisać w postaci ogólnej:

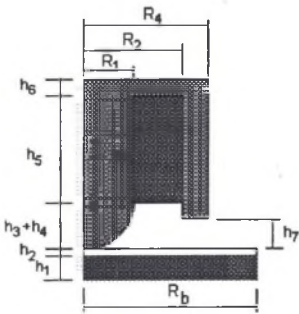
$$U = F_{pn}(B), \quad (2)$$

gdzie:

U - oznacza wartość skuteczną napięcia mierzonego na wyprowadzeniach uzwojenia pomiarowego.

Wyodrębnienie w zaproponowanym schemacie struktury warstwomierza dwóch niezależnych, a konstrukcyjnie zintegrowanych elementów przetwornika: czujnika i przetwornika natury sygnału wynika z:

- różnych zjawisk fizycznych, według których zachodzi przetwarzanie,
- możliwości niezależnego modelowania ich właściwości i opracowania fizyko-matematycznych modeli,



Rys.3. Szkic geometrii i oznaczenia wymiarów przekroju modelu przetwornika grubości

Fig.3. Dimensions of the coating thickness transducer model cross-section

- charakter źródła zasilającego przetwornik – wartość gęstości prądu zasilającego i jego częstotliwość.

Na rysunku 3 przedstawiono szkic półprzekroju osiowosymetrycznego modelu przetwornika grubości. Model ten odpowiada konstrukcji rzeczywistego przetwornika.

3. ZALEŻNOŚCI W OPISIE HARMONICZNEGO POLA ELEKTROMAGNETYCZNEGO W PRZETWORNIKU GRUBOŚCI

Na podstawie przedstawionego opisu budowy tego przetwornika, zasadę jego działania można zakwalifikować do zagadnień związanych z rozkładem pól elektromagnetycznych układów nieruchomych w stanie ustalonym, w środowiskach: ferromagnetycznym i nieferromagnetycznym, przewodzącym i nieprzewodzącym elektrycznie.

Wykorzystując przedstawiony w rozdziale 2 opis konstrukcji elektromagnetycznego przetwornika grubości, przyjęto w budowie jego fizykomatematycznego modelu następujące założenia i uproszczenia:

- a. Uzwojenie zasilające i jednowarstwowe uzwojenie pomiarowe są rozłożone równomiernie wzdłuż trzpienia przetwornika (rys.1).
- b. W uzwojeniu zasilającym przetwornika płynie monoharmoniczny prąd przemienny o stałej amplitudzie i częstotliwości w zakresie 60÷200 Hz.
- c. Wewnątrz obszaru obejmowanego przez uzwojenia (zasilające i pomiarowe) nie występują prądy wirowe.
- d. Układ pomiarowy połączony z uzwojeniem pomiarowym ma nieskończenie dużą impedancję.

- możliwości przetwarzania indukcji w inny sposób, na przykład za pomocą hallotronów [4, 5].

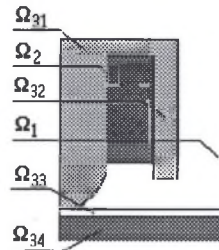
Utworzenie fizykomatematycznego modelu elektromagnetycznego przetwornika grubości w układzie z badanym obiektem polega na wyznaczeniu funkcji F_{pp} i F_{pn} , jako funkcji wielu zmiennych, uwzględniając istotne wielkości wpływowe, jak:

- wymiary geometryczne przetwornika i badanego obiektu, w tym grubości powłoki i podłoża;
- właściwości fizyczne materiałów konstrukcyjnych przetwornika i badanego obiektu – przewodności γ i przenikalności magnetyczne względne μ_r ;

e. Wartości przewodności elektrycznej γ i przenikalności magnetycznej względnej μ_r , charakteryzujące materiały zastosowane do budowy poszczególnych elementów przetwornika oraz obiektu badań, są znane, stałe (środowisko liniowe) i indywidualnie ustalone w określonych podobszarach (rys.4), a zastosowane materiały izotropowe jednorodne.

W związku z przyjętymi założeniami można w obszarze elektromagnetycznego przetwornika grubości i badanego obiektu wyodrębnić trzy typy podobszarów:

- podobszar Ω_1 - nieprzewodzący elektrycznie ($\gamma = 0$), w którym nie występuje wektor gęstości prądu zasilającego J_z - tego typu podobszary utworzone są przez: powietrze otaczające przetwornik grubości i powłokę, jeżeli jest wykonana z materiału nieprzewodzącego elektrycznie (powłoka lakierowa),
- podobszar Ω_2 - w którym występuje wektor gęstości prądu zasilającego J_z i w płaszczyźnie przekroju osiowego nie mogą płynąć prądy wirowe (punkt d założeń), - tworzy go uzwojenie cewki,
- podobszar Ω_3 - przewodzący elektrycznie ($\gamma > 0$), w którym nie występuje wektor gęstości prądu zasilającego J_z - tego typu podobszary utworzone są przez: trzpień, osłonę, podłoże i powłokę, jeżeli jest wykonana z materiału przewodzącego elektrycznie (cynk).



Rys.4. Szkic. Identyfikacja podobszarów w przekroju przetwornika grubości

Fig.4. Identification of subzones of the thickness transducer half section

Identyfikację poszczególnych typów podobszarów w przetworniku i badanym obiekcie przedstawiono na rys.4.

Przyjęte w tym rozdziale założenia pozwalają dodatkowo rozpatrzeć możliwość wykorzystania analizy harmonicznej w modelowaniu rozkładu pola elektromagnetycznego w przetworniku.

W celu opisanego jednorodnego, izotropowego, liniowego pola elektromagnetycznego harmonicznego występującego w elektromagnetycznym przetworniku grubości, można przyjąć parę zespolonych potencjałów: potencjał magnetyczny wektorowy \underline{A} i potencjał elektryczny skalarny \underline{V} . Zastosowanie tych wielkości pola elektromagnetycznego jest szczególnie przydatne przy rozwiązywaniu zagadnień elektromagnetycznych dwuwymiarowych, jakie występują w przypadku elektromagnetycznego przetwornika grubości.

W rozważanym polu elektromagnetycznym, zespolony potencjał magnetyczny wektorowy \underline{A} można określić za pomocą wzoru

$$\underline{B} = \text{rot} \underline{A} \tag{3}$$

Wyznaczenie rozkładu pola potencjału magnetycznego wektorowego \underline{A} umożliwi wyznaczenie poszukiwanego rozkładu pola indukcji magnetycznej \underline{B} .

Dla obszaru elektromagnetycznego przetwornika grubości i badanego obiektu, można w poszczególnych podobzarach (rys.4) zapisać następujące układy równań pola [6]:

$$\Omega_1(\gamma=0, \underline{J}_z=0) \quad \nabla^2 \underline{A}=0, \quad (4)$$

$$\Omega_2(\gamma=0, \underline{J}_z \neq 0) \quad \nabla^2 \underline{A} = -\mu \underline{J}_z, \quad (5)$$

$$\Omega_3(\gamma \neq 0, \underline{J}_z=0) \quad \begin{aligned} \nabla^2 \underline{A} - j\omega\mu\gamma \underline{A} &= 0, \\ \nabla^2 \underline{\varphi} - j\omega\mu\gamma \underline{V} &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Z przyjętych wcześniej założeń wynika, że zespolony wektor gęstości prądu zasilającego \underline{J}_z i zespolony potencjał magnetyczny wektorowy \underline{A} są funkcjami jedynie współrzędnych r i y (rys.1). Biorąc to pod uwagę i uwzględniając symetrię osiową przetwornika, równania (4) do (6) w zakresie potencjału \underline{A} możemy przekształcić do postaci cylindrycznej, dwuwymiarowej i zapisać w postaci skalarnej [7]:

$$\Omega_1 \quad \left(\frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \underline{A}_\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial y^2} - \frac{\underline{A}_\phi}{r^2} \right) = 0, \quad (7)$$

$$\Omega_2 \quad \left(\frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \underline{A}_\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial y^2} - \frac{\underline{A}_\phi}{r^2} \right) = -\mu \underline{J}_\phi, \quad (8)$$

$$\Omega_3 \quad \left(\frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial \underline{A}_\phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \underline{A}_\phi}{\partial y^2} - \frac{\underline{A}_\phi}{r^2} \right) - j\omega\mu\gamma \underline{A}_\phi = 0, \quad (9)$$

gdzie:

$\underline{A} = \underline{A}_\phi \underline{I}_\phi$ i $\underline{J}_z = \underline{J}_\phi \underline{I}_\phi$, a \underline{I}_ϕ jest wektorem jednostkowym w układzie współrzędnych cylindrycznych.

Ze względu na symetrię osiową przetwornika i badanego obiektu, obliczenia potencjału \underline{A}_ϕ wystarczy przeprowadzić dla półprzekroju modelu (rys.1). W takim przypadku warunki brzegowe wynikają z:

- braku występowania składowej normalnej wektora indukcji magnetycznej wzdłuż osi symetrii przetwornika i obiektu badań,
- zanikania wektora indukcji magnetycznej w dalekim otoczeniu przetwornika.

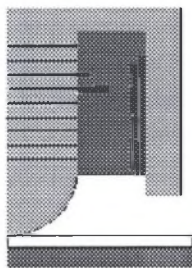
Wystarczy teraz w układzie elektromagnetycznego przetwornika grubości i obiektu badań zidentyfikować podobzary Ω_n , ze względu na ich właściwości fizyczne (rys.4), wymiary geometryczne oraz przyporządkować im odpowiednie zależności (7)-(9) i warunki brzegowe, aby utworzyć fizykomatematyczny model układu elektromagnetycznego przetwornika grubości i obiektu badań. Należy też zauważyć, że wielkości γ i μ_r , określane dla materiałów

w poszczególnych podobszarach, zadawane wymuszenia (J_z , ω), jak i możliwości projektowania dowolnych kształtów podobszarów przetwornika i obiektu badań są wzajemnie niezależne.

4. ZASTOSOWANIE PAKIETU ANSYS/EMAG W ANALIZIE WŁAŚCIWOŚCI MODELU PRZETWORNIKA GRUBOŚCI

Wyznaczenie rozkładu harmonicznego pola magnetycznego potencjału wektorowego A_ϕ , w układzie elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki i badanego obiektu, przeprowadzono stosując opracowany przez autora zestaw programów obliczeniowych wykorzystujących procedury i polecenia pakietu ANSYS/Emag. (2-D Harmonic Analysis) [8, 9].

Uwzględniono wszystkie założenia przyjęte w rozdziale 3. Przyjęta struktura programów obliczeniowych umożliwiła wyznaczenie macierzy potencjału A_ϕ w węzłach sieci elementów skończonych, obejmującej obszar przeprowadzanej analizy. Procedury programów obliczeniowych wymagały wcześniejszego indywidualnego wprowadzenia wartości wielkości fizycznych, odpowiadających właściwościom elementów układu przetwornika i obiektu badań (μ_r , γ), jego wymiarów – w tym grubości powłoki i podłoża (h_2 i h_1)- oraz wymuszeń - wartości gęstości prądu zasilającego (J_ϕ) i jego częstotliwości (f). Wykorzystując opracowane procedury identyfikacji, indywidualnie przyporządkowano poszczególnym podobszarom stałe wartości przenikalności magnetycznej względnej. Odpowiadały one średnim wartościom indukcji magnetycznej w tych podobszarach.



Rys.5. Szkic układu zwojów uzwojenia pomiarowego w modelu przetwornika

Fig.5. Arrangement of the measuring winding coils of the transducer model

Pakiet ANSYS/Emag wyposażony jest w makropolecenie programowe FLUXV do obliczeń strumienia magnetycznego przenikającego przez dowolną wskazaną programowo powierzchnię w obszarze analizowanego modelu. Uwzględniając procedury tego makropolecenia oraz wyniki obliczeń macierzy potencjału magnetycznego wektorowego A_ϕ , wyznaczano strumienie magnetyczne skojarzone ze zwojami uzwojenia pomiarowego (rys.5).

Następnie zgodnie z zależnością (10) obliczono napięcie indukujące się na zaciskach uzwojenia pomiarowego

$$U = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^k \Phi_i(h_2), \quad (10)$$

gdzie:

U oznacza skuteczną wartość napięcia indukowanego na wyprowadzeniach uzwojenia pomiarowego,

a $\Phi_i(h_2)$ jest obliczonym numerycznie modułem strumienia skojarzonego z i -tym zwojem uzwojenia pomiarowego, uwzględnione w modelu przetwornika.

Zależność (10) przedstawia numeryczną postać funkcji przetwarzania, określoną dla modelu układu elektromagnetycznego przetwornika grubości i badanego obiektu.

5. WYBRANE ANALIZY NUMERYCZNEGO MODELU ELEKTROMAGNETYCZNEGO PRZETWORNIKA GRUBOŚCI

Opisane w rozdziale 4 programy obliczeniowe, opracowane przy wykorzystaniu pakietu ANSYS, umożliwiają zgodnie z założeniami pracy indywidualne analizowanie oddziaływania wybranych wielkości wpływowych na funkcję przetwarzania przetwornika. Wykaz wielkości wpływowych oraz przewidywane ich wartości przedstawia tablica 1. Zamieszczone w tabeli wymiary geometryczne modelu przetwornika odpowiadają konstrukcji rzeczywistego przetwornika.

Wykorzystując wyniki numerycznych obliczeń wartości strumieni magnetycznych, skojarzonych z poszczególnymi zwojami uzwojenia pomiarowego, wyznaczono napięcie U , indukowane na wyprowadzeniach tego uzwojenia (wielkość wyjściowa przetwornika). Przykładowe wyniki obliczeń wartości strumieni dla różnych grubości powłok cynkowych (h_2) przedstawiono na rys.6. Z analizy wyznaczonych charakterystyk wynika, że wartość strumienia magnetycznego maleje wzdłuż trzpienia modelu przetwornika w kierunku powłoki, co jest dowodem występowania wzdłuż trzpienia rozproszenia strumienia magnetycznego. Można równocześnie zauważyć wpływ grubości powłoki na wartości strumienia magnetycznego.

W rzeczywistych pomiarach największe znaczenie mają wielkości wpływowe charakteryzujące obiekt badań – materiał podłoża i powłoki. W związku z tym przedmiotem zainteresowania jest oddziaływanie trzech wybranych wielkości wpływowych: przenikalności magnetycznej względnej materiału podłoża, grubości podłoża oraz przewodności elektrycznej powłoki na wielkość wyjściową przetwornika - napięcie U .

Funkcją przetwarzania badanego przetwornika grubości powłoki jest zależność napięcia U (wielkość wyjściowa przetwornika), mierzonego na wyprowadzeniach pomiarowego uzwojenia przetwornika, od grubości powłoki.

Tablica 1

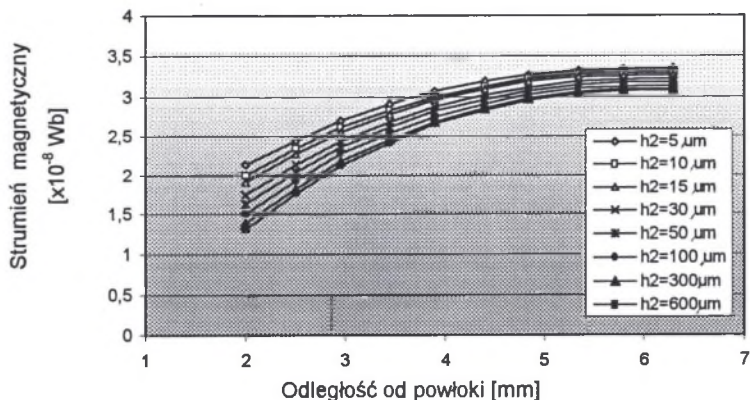
Wymiary geometryczne modelu układu przetwornika grubości i badanego obiektu oraz dopuszczalne zakresy wartości istotnych wielkości wpływowych

WIELKOŚĆ WPŁYWOWA	OZNACZENIE WIELKOŚCI	JEDNOSTKA	WARTOŚCI WIELKOŚCI WPŁYWOWYCH
Promień trzpienia	R_1	mm	2
Długość trzpienia	$h_3+h_4+h_5$	mm	6,75
Długość całego przetwornika	$h_3+h_4+h_5+h_6$	mm	7,5
Zewnętrzny promień osłony przetwornika	R_4	mm	5
Wewnętrzny promień słony przetwornika	R_2	mm	4
Promień obiektu badań	R_b	mm	13,5
Wysokość osłony nad powłoką	h_7	mm	1,3
Grubość podłoża	h_1	mm	0,5÷5
Grubość powłoki	h_2	μm	0÷1000
Przenikalność magnetyczna względna materiału podłoża	μ_{pd}		50÷5000
Przenikalność magnetyczna względna materiału przetwornika	μ_{rcz}		30÷5000
Rezystywność materiału powłoki (cynk)	ρ_{pw}	$\Omega \cdot \text{m}$	$7,0 \cdot 10^{-8}$
Rezystywność materiału podłoża (stal konstrukcyjna)	ρ_{pd}	$\Omega \cdot \text{m}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$
Rezystywność materiału przetwornika	ρ_{cz}	$\Omega \cdot \text{m}$	$(1,5 \div 5,5) \cdot 10^{-7}$
Gęstość prądu zasilającego	j	mA/mm^2	$10^2 \div 10^3$
Częstotliwość prądu wymuszenia	f	Hz	60÷90

W analizach numerycznych za miarę oddziaływania wielkości wpływowych na napięcie wyjściowe U przetwornika przyjęto względną zmianę napięcia δ_U , określoną zależnością 11. Napięcie odniesienia U_0 odpowiada napięciu U , dla przypadku bezpośredniego zestyku trzpienia przetwornika z podłożem. Procedury użytkowania rzeczywistych warstwowierzy przewidują ustalenie wskazania początkowego przyrządu dla takiego wzajemnego położenia przetwornik i podłoża.

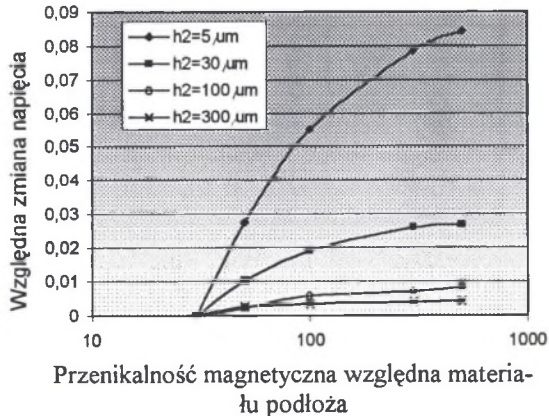
$$\delta_U = \frac{U - U_0}{U_0} \quad (11)$$

Wyniki wybranych analiz, oddziaływania wielkości wpływowych na napięcie U zamieszczono na kolejnych rysunkach.



Rys.6. Rozkład strumieni magnetycznych Φ_i , obliczonych w wybranych przekrojach trzpienia przetwornika, dla różnych grubości powłok

Fig.6. Distribution of magnetic fluxes Φ_i calculated in the selected cross-sections of the transducer core coupled with the measuring winding wils for different coating thickness



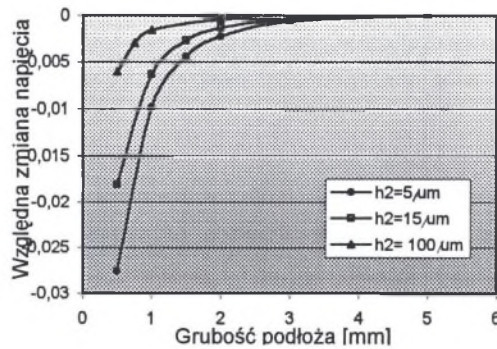
Rys.7. Zależność względnej zmiany napięcia przetwornika od grubości powłoki, dla różnych wartości przenikalności magnetycznych względnych materiałów podłoża

Fig.7. Dependence of the transducer voltage relative change on the coating thickness for different values of the relative magnetic permeability of substrate material

Na rys.7 przedstawiono wpływ rdzeni materiałów podłoża, o różnych wartościach przenikalności magnetycznych względnych, na względną zmianę napięcia δU . Szczególnie silne jest oddziaływanie tych materiałów, które charakteryzują niewielkie wartości przenikalności magnetycznych względnych, czyli w zakresie najczęściej spotykanym w praktycznych zasto-

sowaniach. Dla małych grubości powłoki - np. $5 \mu\text{m}$, względna zmiana napięcia na zaciskach uzwojenia pomiarowego może, z powodu niewielkiej nawet zmiany przenikalności magnetycznej względnej materiału podłoża (np. od 30 do 100), osiągnąć poziom kilku procentów. Równocześnie z przebiegu charakterystyk przedstawionych na rys.7 wynika, że czułość przetwornika maleje ze wzrostem grubości powłoki.

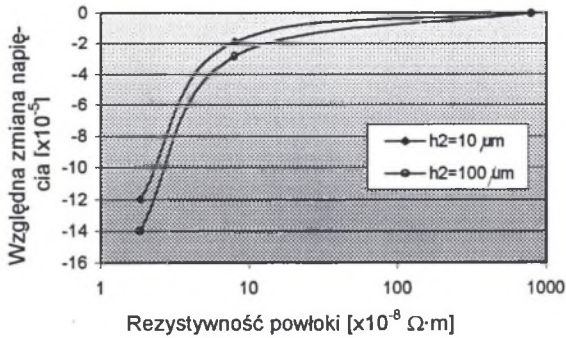
Analizie poddane zostało również oddziaływanie grubości podłoża na względną zmianę napięcia δU . Wyniki obliczeń przedstawiono na rys.8. Największa wrażliwość napięcia wyjściowego U , na oddziaływanie zmian grubości podłoża, zachodzi w przypadku najmniejszej grubości powłoki. Obliczone numerycznie względne zmiany napięcia różniły się o kilka procent, przy zmianie grubości podłoża w zakresie od $0,5 \text{ mm}$ do 5 mm . Taka właściwość modelu przetwornika potwierdza konieczność praktycznie realizowanego adjustowania rzeczywistego przetwornika na podłożach o grubościach identycznych z badanymi, szczególnie w przypadku cienkich podłoży.



Rys.8. Zależność względnej zmiany napięcia obliczonego dla pomiarowego uzwojenia przetwornika grubości od grubości podłoża, dla różnych grubości powłoki

Fig.8. Dependence of the relative change of the voltage calculated for the transducer measuring winding on the substrate thickness for different coating thickness

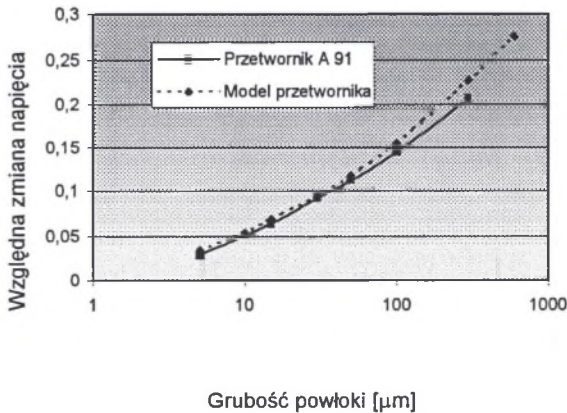
Kolejna analiza dotyczyła określenia wpływu prądów wirowych, indukowanych w przewodzących powłokach, na względną zmianę napięcia δU przetwornika. Częstotliwość prądu wymuszającego pole magnetyczne w przetworniku była niewielka i w przeprowadzanych analizach wynosiła 82 Hz . Obliczenia numeryczne zrealizowano dla kilku materiałów powłok o różnych rezystywnościach. Zakres rezystywności obejmował materiały od bardzo dobrych, aż do słabych przewodników. Wyniki obliczeń dla powłok o grubościach 10 i $100 \mu\text{m}$ przedstawiono na rys.9. Względna zmiana napięcia obliczonego dla analizowanego zakresu zmian rezystywności wynosiła około 10^{-4} . Zgodnie z oczekiwaniami, stwierdzono niewielki wpływ oddziaływania prądów wirowych na wynik pomiaru grubości.



Rys.9. Zależność względnej zmiany napięcia obliczonego dla uzwojenia pomiarowego przetwornika grubości powłoki w zależności od rezystywności materiału powłoki

Fig.9. Dependence of the relative change of the voltage calculated for the transducer measuring winding on the coating material resistivity

Wiarygodność opracowanego fizykomatematycznego modelu elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki zweryfikowano eksperymentalnie. Porównano zależności względnych zmian napięcia wyjściowego δU od grubości powłoki, obliczone dla modelu numerycznego przetwornika o konstrukcji odpowiadającej przetwornikowi typu A 91 z wynikami pomiarów grubości powłok rzeczywistym przetwornikiem grubości.



Rys.10. Zależność względnej zmiany napięcia wyjściowego przetwornika od grubości powłoki dla modelu i rzeczywistego przetwornika

Fig.10. Dependence of the relative change of the transducer output voltage on the coating thickness for the model and the real transducer

W modelu uwzględniono wszystkie istotne wartości wielkości wpływowych, charakteryzujących przetwornik i obiekt badań (tab.1), wcześniej wyznaczone eksperymentalnie. Porównanie przeprowadzono w zakresie grubości powłoki do 300 μm . Przykładowe rezultaty zestawiono na rys.10.

Maksymalna różnica pomiędzy wartościami względnych zmian napięcia δ_U – obliczonej dla modelu i zmierzonej w eksperymencie - wynosiła około 10%, dla przyjętego zakresu grubości powłoki. W zakresie grubości powłok do 50 μm wartość tej różnicy była znacznie mniejsza, a zmiana wielkości wpływowych nie powodowała istotnych zmian tej różnicy.

6. WNIOSKI

Dla opracowanego modelu numerycznego, elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki, maksymalny błąd odwzorowania rzeczywistego przetwornika w jego modelu wynosi około 10%. Model może więc znaleźć zastosowanie do badania oddziaływania wybranych wielkości wpływowych w funkcji przetwarzania na wielkość wyjściową przetwornika.

LITERATURA

1. PN-86/H-04623 Ochrona przed korozją. Pomiar grubości powłok metalowych metodami nieniszczącymi.
2. Instruments for coating thickness measurement and material testing. Katalog firmy Helmut Fischer GmbH + Co, Sindelfingenn 1995.
3. ANSYS Analysis Guides, First Edition, SAS IP, Inc.©
4. Janiczek R., Woszczyzna I.: Metoda pomiaru grubości warstw o odmiennej przenikalności magnetycznej od podłoża ferromagnetycznego. PAK nr 9, 1985.
5. Bronkiewicz A., Janiczek R.: Zagadnienia pomiarów grubości nie ferromagnetycznych warstw wierzchnich z zastosowaniem magnetycznych metod pomiarowych w zależności od namagnesowania podłoża ferromagnetycznego. Materiały konferencyjne, V Krajowe Sympozjum Pomiarów Magnetycznych, Kielce 1997.
6. Bolkowski S., Stabrowski M., Skoczyła J., Sroka J., Sikora J., Wincenciak S.: Komputerowe metody analizy pola elektromagnetycznego. WNT, Warszawa 1993.
7. McIntire P.: Nondestructive testing handbook. Volume 6. Magnetic particle testing. 2nd edition. ASNT 1989.
8. ANSYS Electromagnetic Field Analysis Guide. 2nd edition. SAS IP, Inc.©

9. Kasperczyk B.: Model numeryczny elektromagnetycznego przetwornika grubości powłoki. *Badania nieniszczące*, z. 5. Wydawnictwo Polskiego Towarzystwa Badań Nieniszczących i Diagnostyki Technicznej, Warszawa 2000.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Stefan KUBISA

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 stycznia 2002 r.

Ostateczną wersję dostarczono 7 listopada 2002 r.

Abstract

The paper presents the physical-mathematical model of a coating thickness electromagnetic transducer as well as the results of analysis of its selected properties. Calculations are carried out for the axial-symmetrical construction of the transducer. The thickness of the tested non-ferrous coating is the air-gap in a magnetic core including the ferromagnetic transducer and ferromagnetic substrate of the coating. The transfer function of the transducer is formulated as well. It shows that the voltage induced by the magnetic flux density in the transducer magnetic core at the terminals of the transducer measuring winding is dependent on the coating thickness. The essential physical quantities influencing the transducer transfer function are taken into account. In order to calculate the magnetic flux values there are used ANSYS/Emag (2-D Harmonic Analysis) procedures. The real transducer magnetic properties and its geometric dimensions are taken into consideration in the calculations.

The analysis of the properties of the coating thickness electromagnetic transducer model is carried out for three selected influence quantities. The essential influence of relative values of the substrate material magnetic permeability as well as of the substrate thickness on the result of the substrate thickness measurement is proved computationally. Moreover, it is shown that the influence of the substrate material conductivity on the measurement result is negligible.

The experimental verification proves that the calculations for the physical-mathematical model of the coating thickness transducer and the results of the tests are close enough to be satisfactory.